پیش‌بینی نمودارهای حد شکل‌دهی و حد تنش شکل‌دهی برای آلیاژ آلومینیم ۳۱۰۵ با استفاده از روش اجزای محدود و معیارهای شکست نرم*

مهدی صفری[۱] سید جمال حسینی پور[۲] حامد دیلمی عضدی[۳] عبدالحمید گرجی[٤]

چکیده

نمودارهای حد شکل‌دهی (FLD) ابزار بسیار مفیدی برای پیش‌بینی شکل‌پذیری ورق‌های فلزی هستند. با این وجود، استفاده از این نمودارها تنها زمانی سودمند است که بارگذاری متناسب باشد، یعنی نسبت بین تنش‌های اصلی در فرایند شکل‌دهی ثابت باقی بماند. بنابراین، نمودارهای حد تنش شکل‌دهی (FLSD) که به مسیر کرنش وابسته نیستند، به‌کار رفته‌اند. در این تحقیق، ابتدا نمودار حد شکل‌دهی برای آلیاژ آلومینیم ۳۱۰۵ به‌روش تجربی و با استفاده از آزمون کشش خارج از صفحه‌ی ناکازیما به‌دست آمد. سپس با استفاده از نظریه‌ی رفتار موم‌سان، نمودار حد تنش شکل‌دهی محاسبه شد. افزون بر این، به‌کمک معیار شکست نرم و شبیه‌سازی به‌روش اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS نمودارهای حد شکل‌دهی و حد تنش شکل‌دهی برای آلیاژ آلومینیم ۳۱۰۵ پیش‌بینی شدند. نتایج حاصل نشان دادند که نمودارهای حاصل از اعمال معیارهای شکست نرم تطابق نسبتاً خوبی با نتایج تجربی داشته و می‌توان از آن‌ها برای پیش‌بینی قابل قبول نمودارهای حد شکل‌دهی آلیاژهای آلومینیم استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی نمودار حد شکل‌دهی، نمودار حد تنش شکل‌دهی، معیار شکست نرم.

Prediction of Forming Limit Diagrams (FLD) and Forming Limit Stress Diagrams (FLSD) for Aluminum Alloy 3105 with Finite Element Method using Ductile Fracture Criteria

M. Safari S. J. Hosseinipour H. D .Azodi A. Gorji

Abstract

Forming limit diagrams (FLDs) are very powerful tool for prediction of the formability of sheet metals. However, it has been shown that FLD diagrams are valid only for proportional loadings during which the ratio between the principal stresses remains constant throughout the forming process. Therefore, forming limit stress diagrams (FLSDs), which are independent of the straining path, have been developed. In this work, the forming limit diagram for aluminum alloy 3105 was first obtained experimentally using the Nakazima out-of-plane test. The forming limit stress diagram was then calculated by the application of plasticity theory. In addition, the FLDs and FLSDs for AA3105 were simulated using ABAUUS finite element software through the application of a ductile fracture criterion. The results showed that the diagrams obtained by the application of the ductile fracture criterion are relatively in good agreements with the experimental results, and hence, can be successfully used for the prediction of forming limit diagrams of the aluminum alloys.

Key Words Forming limit diagram, Forming limit stress diagram, Ductile fracture criterion.

---

* نسخه نخست مقاله در تاریخ ۸۸/۷/۲۱ و نسخه پایانی آن در تاریخ ۸۹/۵/۹ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد الیگودرز

(۲) عهده‌دار مکاتبات: استادیار، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل

(۳) استادیار، گروه ساخت و تولید، دانشکده فنی مهندسی اراک، دانشگاه علم و صنعت ایران

(٤) دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل

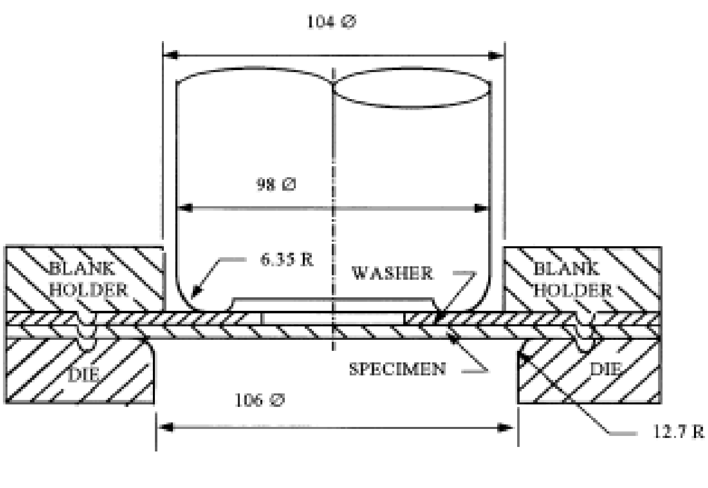
مقدمه

شکل‌پذیری ورق را می‌توان قابلیت آن برای تغییر شکل بدون پارگی و گلویی شدن، تعریف کرد [1]. ورق‌ها را می‌توان تنها تا حد معینی تغییر شکل داد، و این حد با آغاز گلویی شدن موضعی که نهایتاً منجر به پارگی آن می‌شود، مشخص می‌شود. رسم نمودار حد شکل‌دهی (FLD)، یکی از روش‌های مرسوم برای تعیین این محدوده است. این نمودار، تغییرات کرنش اصلی بزرگ‌تر (ε_1) در لحظه‌ی گلویی شدن را بر حسب کرنش اصلی کوچک‌تر (ε_2) نشان می‌دهد. نمودارهای حد شکل‌دهی برای اولین بار توسط کیلر و بک‌اُفن در سال ۱۹٦۳ رسم شدند. آنها سمت راست نمودار حد شکل‌دهی را با اتّساع ورق‌های فولادی کم کربن به‌دست آوردند [2]. سپس گودوین در سال ۱۹٦۸، سمت چپ نمودار را نیز به‌دست آورد [3]. او ترکیبی از دو فرایند کشش ساده‌ی تک‌محوری (کشش یک نمونه‌ی ساده‌ی مستطیلی از دو انتها) و کشش عمیق (کشیدن لوح به درون قالب با یک سنبه‌ی استوانه‌ای) را با استفاده از ورق‌های فولادی کم کربن به‌کار گرفت و با افزودن آزمایش‌های خود به آزمایش‌های کیلر و بک‌افن، نمودار کامل حد شکل‌دهی را به‌دست آورد. هکر در سال ۱۹۷۵ با اتّساع ورق‌هایی با عرض‌های مختلف بر روی یک سنبه‌ی نیم‌کروی، دو طرف نمودار حد شکل‌دهی را به‌دست آورد [4]. نمودار حد شکل‌دهی معمولاً با یکی از روش‌های زیر تعیین می‌شود:

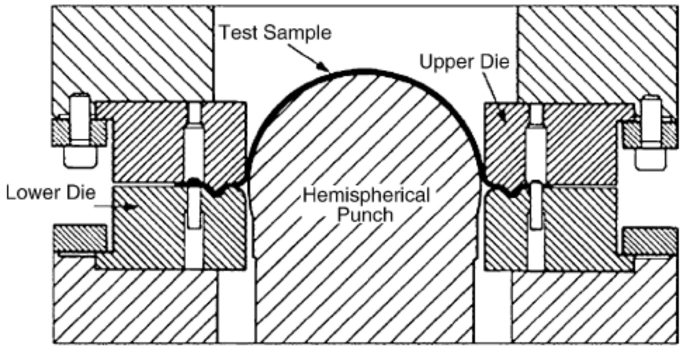
روش اول *– آزمون کشش در صفحه‌ی مارسینیاک.* در این روش، ورق فلزی با یک سنبه‌ی استوانه‌ای کشیده شده و از یک جدا کننده بین ورق و سنبه که در مرکز آن یک سوراخ وجود دارد، استفاده می‌شود. استفاده از این ترکیب باعث تغییر شکل بدون اصطکاک ورق می‌شود. شمای کلی این روش در شکل (۱) نشان داده شده است.

روش دوم *– آزمون خارج از صفحه‌ی ناکازیما.* در این روش، از یک سنبه با سر کروی استفاده می‌شود. با توجه به وجود اصطکاک در این آزمون، روان‌کار مناسب به‌کار می‌رود. در این آزمون، مسیرهای لازم برای کرنش را می‌توان به‌کمک روان‌کارهای مختلف و یا با استفاده از نمونه‌هایی با عرض متفاوت ایجاد کرد. شمای کلی آزمون ناکازیما در شکل (۲) نمایش داده شده است.

در این تحقیق، از آزمون ناکازیما استفاده شده است.



شکل ۱ شمای کلی از آزمون کشش در صفحه‌ی مارسینیاک [16]



شکل۲ شمای کلی از آزمون خارج از صفحه‌ی ناکازیما [4]

اگرچه رسم نمودارهای حد شکل‌دهی روش مناسبی برای تحلیل شکل‌پذیری مواد فلزی است، امّا تنها زمانی می‌توان از آن استفاده کرد که بارگذاری متناسب باشد، یعنی وقتی که نسبت بین کرنش‌های اصلی در طول فرایند شکل‌دهی ثابت بماند. از آنجا که نمودارهای حد شکل‌دهی شدیداً به مسیر کرنش وابسته است، اهمیت این محدودیت بیش‌تر می‌شود. با تغییر مسیر کرنش در یک فرایند شکل دهی، شکل نمودارهای حد شکل‌دهی و در نتیجه، نحوه‌ی تصمیم‌گیری طرّاح در مورد آن نیز تغییر می‌کند. برای رفع این مشکل، نمودارهای حد تنش شکل‌دهی (FLSD) که مستقل از مسیر کرنش هستند، مورد توجه قرار گرفته‌اند. نمودارهای حد تنش شکل‌دهی نشان‌دهنده‌ی ارتباط بین تنش‌های اصلی بزرگ‌تر (σ_1) و کوچک‌تر (σ_2) در ورق هستند، در حالی‌که نمودارهای حد کرنش شکل‌دهی نشان‌دهنده‌ی ارتباط بین کرنش‌های اصلی بزرگ‌تر (ε_1) و کوچک‌تر (ε_2) در ورق می‌باشند. عدم حساسیت نمودارهای حد تنش شکل‌دهی به مسیر کرنش، مزیت اصلی آن‌هاست. کلیمولا و پلیکیکانگس، محدودیت‌های نمودار حد شکل‌دهی برای تحلیل فرایند لبه‌زنی مس، برنج و فولادها را نشان داده‌اند [5]. آن‌ها نمودار حد تنش شکل‌دهی را به‌عنوان جای‌گزین مناسب برای آن پیشنهاد کرده و نشان دادند که نمودارهای تنش‌مبنا، مستقل از مسیر کرنش هستند. آریکس و همکاران نیز استفاده از معیار تنش‌مبنا را برای فرایندهای ثانویه‌ی شکل‌دهی مانند کشش مجدد (Redrawing) پیشنهاد کردند [6]. با وجود اهمیّت کشف نمودارهای حد تنش شکل‌دهی، توجه زیادی به آن‌ها در دهه‌های ۸۰ و ۹۰ میلادی نشد. استافتون مجدداً نمودارهای حد تنش شکل‌دهی را بررسی کرده و عنوان کرده است که استفاده از معیار تنش‌مبنا برای کلیه‌ی فرایندها ضروری است [7]. تحلیل المان محدود (FEA) از سال ۱۹۷۰ برای تهیه‌ی اطلاعات لازم از یک فرایند واقعی شکل‌دهی در صنعت، کاربرد گسترده‌ای یافته است. معمولاً با این روش تحلیل اطلاعاتی مانند شکل تغییر یافته، توزیع تنش و کرنش، نیروی سنبه و پارگی به‌دست می‌آیند. افزون بر این، استفاده از معیارهای شکست نرم در سال‌های اخیر برای پیش‌بینی نمودارهای حد شکل‌دهی و حد تنش شکل‌دهی رواج زیادی یافته‌اند. در سال ۱۹۹۹، تاکودا و همکارانش با استفاده از معیارهای شکست نرم مانند کاکرافت، برزو، اویان و کلیفت، و روش المان محدود، نمودار حد شکل‌دهی را برای چند نوع فولاد و آلیاژ آلومینیم پیش‌بینی کردند [8]. آن‌ها نتایج به‌دست آمده را با نتایج تجربی مقایسه کرده و نشان دادند که نمودار حد

شکل‌دهی را می‌توان با استفاده از معیارهای شکست نرم به‌خوبی پیش‌بینی کرد. جین و همکارانش در سال ۱۹۹۹، نمودار حد شکل‌دهی در مرحله‌ی گلویی (FLCN) و نمودار حد شکل‌دهی در مرحله‌ی شکست (FLCF) را برای آلیاژ آلومینیم ۶۱۱۱ به‌دست آوردند [9]. آن‌ها نشان دادند که نمودار حد شکل‌دهی در مرحله‌ی شکست برای آلیاژ آلومینیم ۶۱۱۱ دارای شکل پیچیده‌ای بوده و در ناحیه‌ی کشش دومحوری، به نمودار حد شکل‌دهی در مرحله‌ی گلویی تبدیل می‌شود. تاکودا و همکارانش در سال ۲۰۰۰، نمودار حد شکل‌دهی در مرحله‌ی گلویی و شکست را برای آلیاژ آلومینیم ۱۱۰۰ به‌دست آوردند [10]. نمودار حد شکل‌دهی در مرحله‌ی شکست که توسط آن‌ها به‌دست آمد، خطی بود. افزون بر این، آن‌ها توانستند نمودار حد شکل‌دهی در مرحله‌ی شکست برای آلومینیم ۱۱۰۰ را با استفاده از معیار شکست نرم به‌شکل تقریباً خطی پیش‌بینی کنند. هونگ نام هان و همکارش در سال ۲۰۰۳، نمودارهای حد شکل‌دهی در مراحل گلویی و شکست را با استفاده از آزمون ناکازیما برای ورق‌های فولادی با شکل‌پذیری مختلف به‌دست آوردند [11]. آزترک و همکارش نیز در سال ۲۰۰۵ نمودار حد شکل‌دهی را به صورت تجربی و عددی برای فولاد آرام شده با آلومینیم با استفاده از آزمون کشش خارج از صفحه به‌دست آورده و آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کردند [1]. نتایج حاصل از شبیه‌سازی آن‌ها تطابق خوبی با نتایج تجربی داشت. افزون بر این، آن‌ها اثر اندازه‌ی شبکه‌بندی و شرایط اصطکاکی بر نمودار حد شکل‌دهی را با استفاده از شبیه‌سازی به‌روش المان محدود بررسی کردند.

در سال‌های اخیر، آلومینیم و آلیاژهای آن کاربرد زیادی در صنعت داشته‌اند، به‌گونه‌ای که صنعت خودروسازی یکی از کاربردهای مهم آن‌ها به حساب می‌آید. کاربردهای دیگر آن‌ها عبارتند از: صنایع حمل و نقل (هوایی، دریایی، ریلی، و ...) و صنایع بسته‌بندی (قوطی و ...). آلیاژهای آلومینیم دسته‌ی ۳۰۰۰، کاربرد زیادی در صنعت (از جمله در ساخت لوازم خانگی) دارند، به‌طوری‌که نوع ۳۱۰۵ از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است.

در این پژوهش، ابتدا نمودار حد شکل‌دهی برای آلیاژ آلومینیم نوع ۳۱۰۵ با استفاده از آزمون کشش خارج از صفحه‌ی ناکازیما به‌دست می‌آید. در ادامه، نمودار حد تنش شکل‌دهی با استفاده از رابطه‌های رفتار مومسان که توسط استافتون پیشنهاد شده‌اند [7]، به‌دست خواهد آمد. افزون بر این، نمودارهای حد کرنش و حد تنش شکل‌دهی با استفاده از معیارهای شکست نرم و به‌کمک نرم افزار ABAQUS پیش‌بینی می‌شوند.

معیارهای شکست نرم

در این پژوهش و در آزمایش‌های تعیین نمودارهای حد شکل‌دهی، از معیارهای شکست نرم ورق استفاده شده است. معیارهای زیادی برای پدیده‌ی شکست نرم بر مبنای مشاهدات تجربی وجود دارند. حد شکل‌دهی ورق‌های فلزی به‌شدت به فرایندهای قبلی انجام شده بر روی آن‌ها بستگی دارد. بنابراین، تنش‌ها و کرنش‌های قبلی را باید در محاسبات در نظر گرفت [8]. کاک‌رافت و لات‌من [12]، برزو و همکارانش [13] و کلیفت و همکارانش [14]، معیارهایی را پیشنهاد داده‌اند که در آن‌ها پیشینه‌ی تنش و کرنش بر وقوع پدیده‌ی شکست نرم تأثیر دارد. کاک‌رافت و لات‌من معیار شکست را بر مبنای شکل‌پذیری حقیقی ارائه کرده‌اند که مطابق آن، شکست مواد نرم موقعی رخ می‌دهد که وضعیت زیر وجود داشته باشد [12]:

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \sigma_{max}\, d\bar{\varepsilon} = C_1 \qquad (1)$$

در این رابطه، σ_{Max} بیش‌ترین تنش عمودی، $\bar{\varepsilon}_f$ کرنش معادل که در آن پارگی رخ می‌دهد، و C_1 ثابت مربوط به جنس ماده می‌باشند. برزو و همکارانش،

معیار کاک‌رافت و لات‌من را برای افزودن تنش‌های هیدروستاتیک به آن، به‌شکل زیر تغییر دادند [13]:

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{2\sigma_{max}}{3(\sigma_{max}-\sigma_h)} d\bar{\varepsilon} = C_2 \quad (۲)$$

در این رابطه نیز σ_h تنش هیدروستاتیک و C_2 ثابت دیگری مربوط به جنس ماده هستند. کلیفت و همکاران نیز رابطه‌ی زیر را بر اساس معیار انرژی یا کار موم‌سان ارائه کرده‌اند [14]:

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} = C_3 \quad (۳)$$

که در آن، $\bar{\sigma}$ تنش معادل و C_3 ثابت سوم مربوط به جنس ماده می‌باشند.

برای تعیین ثابت‌های معیار شکست نرم، از آزمون‌های مختلف استفاده می‌شود. اگر معیار شکست نرم دارای یک ثابت باشد، آزمایش کشش تک‌محوری انجام می‌شود. در صورت وجود ثابت‌های بیش‌تر در معیار، از آزمایش کرنش صفحه‌ای و یا آزمایش بالج استفاده می‌شود.

مواد و روش تحقیق

برای انجام آزمایش، نمونه‌ای تخت از آلیاژ آلومینیم ۳۱۰۵ با ضخامت ۱/۲ میلی‌متر انتخاب شد. ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول (۱) آورده شده است. برای تعیین خواص مکانیکی نمونه، از آزمون کشش تک‌محوری مطابق با استاندارد ASTM B557M (2006) با استفاده از نمونه‌هایی با طول سنجه‌ی ۵۰ میلی‌متر و پهنای ۱۲/۵ میلی‌متر استفاده شد.

با توجه به استفاده از معیارهای کلیفت، کاک‌رافت و برزو در این پژوهش که همگی دارای تنها یک ثابت هستند، برای تعیین ثابت مورد نظر در آن‌ها از آزمایش کشش تک‌محوری استفاده شد. میزان تنش و کرنش در نقطه‌ی شکست از روی نمودار تنش–کرنش ماده استخراج شد. با توجه به حالت تنش و کرنش در آزمون کشش تک‌محوری، مقادیر استخراج شده در معیار شکست نرم قرار گرفت و ثابت معیار برابر با مقدار انتگرال در نظر گرفته شد. مقادیر این ثابت‌ها برای معیارهای کلیفت، کاک‌رافت و برزو به‌ترتیب برابر با ۲۳/۵۸، ۲۸/۳۰ و ۰/۱۰ به‌دست آمد.

برای تعیین ضریب ناهم‌سان‌گردی نیز از آزمون کشش تک‌محوری استفاده شد. اگرچه نسبت کرنش در جهت پهنا به ضخامت به‌عنوان ضریب ناهم‌سان‌گردی تعریف می‌شود، کرنش در جهت ضخامت را نمی‌توان در ورق نازک به‌دقت اندازه‌گیری کرد. بنابراین، کرنش در جهت ضخامت را معمولاً با اندازه‌گیری کرنش‌های طولی و عرضی و با استفاده از اصل حجم ثابت در تغییر شکل موم‌سان ($\varepsilon_t = -(\varepsilon_l + \varepsilon_w)$) به‌دست می‌آورند. برای تعیین ضریب ناهم‌سان‌گردی، نمونه‌هایی هم‌راستا با جهت نورد (R_0)، در جهت ۴۵° نسبت به راستای نورد (R_{45})، و در جهت عمود بر راستای نورد (R_{90}) تهیه شده و آزمون کشش تک‌محوری در مورد آنها انجام گرفت. به این ترتیب، کرنش‌های طولی وعرضی در این نمونه‌ها اندازه‌گیری شدند. ضریب ناهم‌سان‌گردی با استفاده از رابطه‌ی زیر به‌دست آمد:

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = -\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_l + \varepsilon_w} \quad (٤)$$

میزان‌های محاسبه شده‌ی R برای آلیاژ آلومینیم ۳۱۰۵ در جدول (۲) ارائه شده‌اند.

نمونه‌های مورد نیاز برای انجام آزمون کشش خارج از صفحه، با فرایند ماشین‌کاری به دو شکل مستطیل کامل و مستطیلی با دو انتهای ماشین‌کاری شده ساخته شدند. شکل و ابعاد این نمونه‌ها در شکل (۳) و جدول‌های (۳) و (٤) آورده شده‌اند. نمونه‌ها قبل از فرایند شکل‌دهی و برای اندازه‌گیری کرنش در آن‌ها پس از تغییر شکل، شبکه‌بندی شدند. برای این‌کار، از یک مهر ژلاتینی که الگوی شبکه‌بندی مورد نظر به‌صورت برجسته بر روی آن ایجاد شده بود، استفاده

شد و به‌کمک رنگ‌های خاصی که بـر روی ایـن مهـر ایجاد شد.
پوشش داده شده بود، الگوی مورد نظر بر روی نمونه‌ها

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم ۳۱۰۵

Material	Al	Ga	V	Cr	Ti	Zn	Mg	Mn	Cu	Fe	Si
AA3105 (wt.%)	96.95	1	1	2	1	33	61	67	23	81	27

جدول ۲ مقادیر R برای آلیاژ آلومینیم ۳۱۰۵ در جهت‌های مختلف

آلیاژ	R_0	R_{45}	R_{90}	$\overline{R}$
آلومینیم ۳۱۰۵	0.20	0.30	0.24	0.26

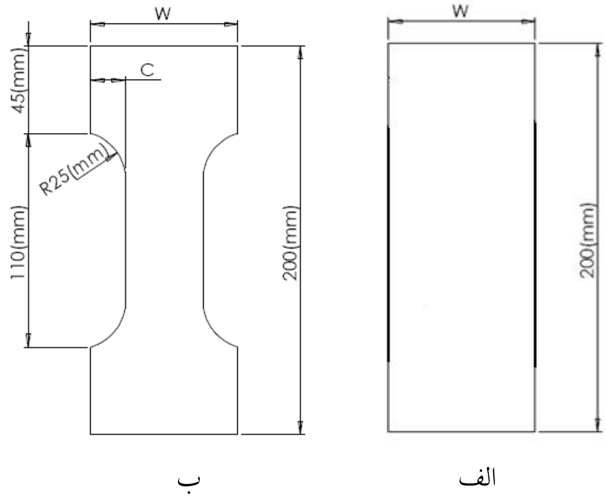
$$\overline{R} = \frac{1}{4}\left(R_0 + 2R_{45} + R_{90}\right)$$

جدول ۳ ابعاد نمونه‌های ساده‌ی مورد استفاده در آزمون کشش خارج از صفحه

شماره نمونه	۱	۲	۳	٤
W(mm)	۱۲۵	۱۵۰	۱۷۵	۲۰۰

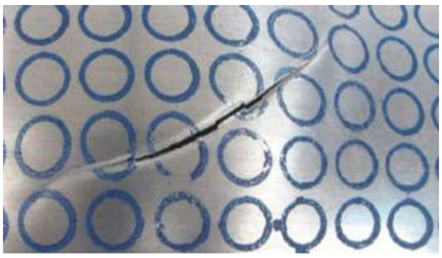
جدول ٤ ابعاد نمونه های ماشینکاری شده ی مورد استفاده
در تست کشش خارج از صفحه

شماره‌ی نمونه	۱	۲	۳	٤
W (mm)	۷۵	۱۰۰	۱۲۵	۱۵۰
C (mm)	۱۷/۵	۲۵	۲۵	۲۵

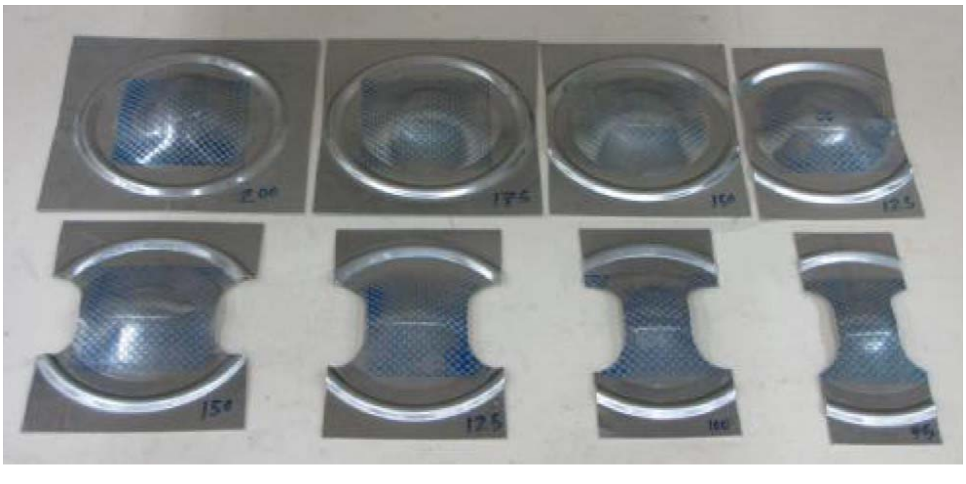


شکل ۳ ابعاد نمونه‌های مورد استفاده در آزمون کشش خارج از صفحه؛ (الف): نمونه‌های ساده، (ب): نمونه‌های ماشین‌کاری شده

برای آزمون کشش، از یک پرس هیدرولیک ٦٠ تن با محدوده‌ی جابجایی ٢٥٠ میلی‌متر استفاده شد که سرعت صفحه‌ی بالایی آن بین ٠/١ تا ٢٠٠ میلی‌متر بر دقیقه تغییر می‌کرد. ابتدا ورق درون قالب قرار گرفت و اطراف آن برای جلوگیری از لغزش با استفاده از ورق‌گیر کاملاً محکم شد. سپس نمونه‌ی ورق به‌کمک سنبه‌ای به قطر ١٠٠ میلی‌متر تا مرحله‌ی پارگی کشیده شد. در حین انجام آزمون، شبکه‌های دایره‌ای شکل به‌دلیل اعمال کرنش‌های ناشی از کشش به آنها به بیضی تبدیل شدند. با اندازه‌گیری قطرهای بزرگ و کوچک بیضی‌ها در بخش‌هایی از شبکه نزدیک به محل پارگی، کرنش‌های حدی برای هر یک از نمونه‌ها محاسبه شدند. کرنش حدی به بیش‌ترین کرنشی گفته می‌شود که ورق می‌تواند بدون پارگی تحمل کند. گلویی شدن موضعی ورق‌ها با مشاهده‌ی شیارهایی در منطقه‌ی تغییر شکل یافته‌ی آن‌ها تشخیص داده شد. شکل (٤) گلویی شدن موضعی را نشان می‌دهد. در شکل (٥) نیز نمونه‌های تغییر شکل یافته از جنس آلیاژ آلومینیم ٣١٠٥ مشاهده می‌شود. از نوار مایلر برای اندازه‌گیری کرنش‌ها استفاده شد. نوار مایلر، نوار شفاف درجه‌بندی شده‌ای است که برای اندازه‌گیری مستقیم کرنش به‌صورت درصد به‌کار می‌رود. برای این‌کار، نوار به‌گونه‌ای بر روی بیضی قرار داده می‌شود که خطوط مشبّک آن با قطر مورد نظر هم‌راستا شوند. سپس نوار مایلر بر روی بیضی آن‌قدر جابجا می‌شود که یکی از خطوط آن با قطر مورد نظر برابر شود. در این لحظه، اندازه‌ی مندرج بر روی خط فوق درصد کرنش مربوط به قطر بیضی را نشان می‌دهد. مقادیر به‌دست آمده کرنش‌های حدی در لحظه‌ی آغاز گلویی شدن را نشان می‌دهند.



شکل ٤ محل پارگی نمونه‌ی کشیده شده



شکل ٥ نمونه‌های تغییر شکل یافته از جنس آلیاژ آلومینیم ٣١٠٥

محاسبه‌ی نمودار حد تنش شکل‌دهی

برای محاسبه‌ی نمودار حد تنش شکل‌دهی، ابتدا کرنش‌های حاصل از آزمون‌های تجربی محاسبه و سپس به تنش‌های مربوطه تبدیل می‌شوند. تبدیل این کرنش‌ها در چند مرحله به شرح زیر رخ می‌دهد:

مرحله‌ی اول: کرنش‌های حدی از آزمون‌های تجربی به‌دست می‌آیند.

مرحله‌ی دوم: کرنش مؤثر با استفاده از کرنش‌های حدی مطابق رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$\bar{\varepsilon}=\sqrt{\frac{4}{3}(1+\rho+\rho^2)}\varepsilon_1 \qquad (5)$$

مرحله‌ی سوم: تنش مؤثر با استفاده از رابطه‌ی تنش-کرنش توانی به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\bar{\sigma}=K\bar{\varepsilon}^n \qquad (6)$$

مرحله‌ی چهارم: نسبت کرنش از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$\rho=\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \qquad (7)$$

نسبت تنش با استفاده از رابطه‌ی (۸) که ارتباط بین ρ و α برای معیار تسلیم هاسفورد را نشان می‌دهد، تعیین می‌شود:

$$\rho=\frac{\alpha^{M-1}-R(1-\alpha)^{M-1}}{1+R(1-\alpha)^{M-1}} \qquad (8)$$

در این رابطه، M ضریب وابسته به نوع ماده است که به آن توان معیار تسلیم هیل می‌گویند. مقدار M برای آلیاژهای آلومینیم تقریباً برابر با ۱/۸ می‌باشد [17]. R نیز ضریب ناهم‌سان‌گردی ماده است.

مرحله‌ی پنجم: تابع $\xi(\alpha)$ محاسبه می‌شود. $\xi(\alpha)$ تابعی است که با توجه به رابطه‌ی $\bar{\sigma}=\sigma_1\xi(\alpha)$ بسته به نوع معیار تسلیم به‌کار رفته تعیین می‌شود [۷]. در این پژوهش، از معیار تسلیم هاسفورد استفاده شد و به این ترتیب، تابع $\xi(\alpha)$ از رابطه‌ی زیر به‌دست آمد:

$$\xi=\left(\frac{1}{(1+R)}(1+|\alpha|^M+r|1-\alpha|^M)\right)^{\frac{1}{M}} \qquad (9)$$

مرحله‌ی ششم: برای ماده‌ای با هم‌سان‌گردی صفحه‌ای و بدون اعمال تنش‌های برشی، تنش‌های حدی در مرحله‌ی اول مسیر کرنش به‌شکل زیر محاسبه می‌شوند [15]:

$$\sigma_1=\frac{\bar{\sigma}_Y}{\xi(\alpha)} \qquad (10)$$

$$\sigma_2=\alpha\sigma_1 \qquad (11)$$

بیش‌ترین تنش حدی تنشی است که ورق می‌تواند بدون پارگی تحمل کند. تنش‌های حدی در مرحله‌ی دوم از مسیر کرنش به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند [15] :

$$\sigma_1=\frac{\bar{\sigma}_Y\left(\bar{\varepsilon}(\varepsilon_{1i},\varepsilon_{2i})+\bar{\varepsilon}(\varepsilon_{1f}-\varepsilon_{1i},\varepsilon_{2f}-\varepsilon_{2i})\right)}{\xi\left(\alpha(\varepsilon_{2f}-\varepsilon_{2i})/(\varepsilon_{1f}-\varepsilon_{1i})\right)} \qquad (12)$$

$$\sigma_2=\alpha\sigma_1 \qquad (13)$$

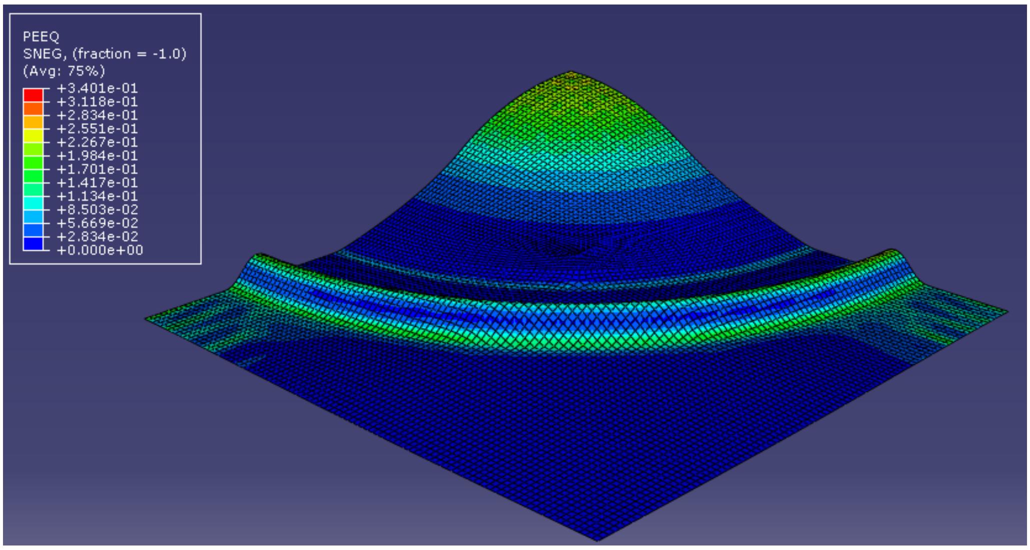
در رابطه‌ی (۱۲)، ε_{1i} و ε_{2i} مقادیر پیش کرنش از مرحله‌ی قبل، و ε_{1f} و ε_{2f} مقادیر نهایی کرنش هستند. در این تحقیق، مقادیر ε_{1i} و ε_{2i} با توجه به عدم اعمال پیش کرنش به ورق‌ها صفر در نظر گرفته شده‌اند.

تحلیل عددی

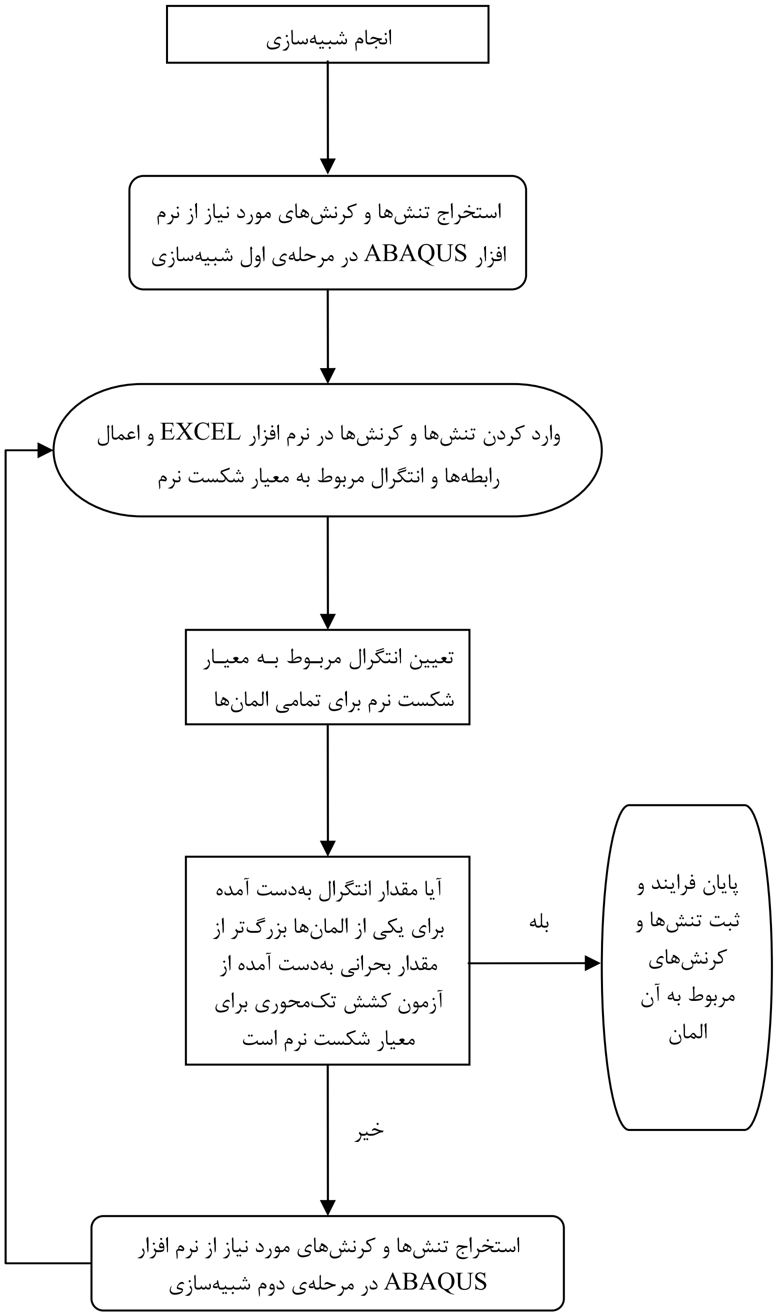
کلیه‌ی شرایط آزمون‌های انجام شده در شبیه‌سازی عددی اعمال شدند. ورق قطعه‌ی شکل پذیر و شکل آن پوسته‌ای در نظر گرفته شد. سنبه، قالب و ورق‌گیر صلب در نظر گرفته شدند. به‌دلیل تقارن هندسی و برای کوتاه شدن زمان تحلیل‌ها، یک چهارم از مجموعه‌ی قالب و ورق مدل شد. برای وارد کردن خواص ورق از جمله چگالی، مدول کشسان، ضریب پوسان، تنش و کرنش از نقطه‌ی تسلیم تا بیش‌ترین تنش کششی و ضریب‌های ناهم‌سان‌گردی در تحلیل، از داده‌های آزمون کشش تک‌محوری بهره گرفته شد. برای به‌دست آوردن تابع تسلیم، نظریه‌ی موم‌سانی ناهم‌سان‌گرد هیل به‌کار رفت. از مدل اصطکاک کولنی با ضریب اصطکاک $\mu=0.11$ استفاده شد، و مسئله با استفاده از روش حل صریح (Explicit) حل شد. رابطه‌ی تنش- کرنش به‌شکل توانی در نظر گرفته شد. در شکل(٦)، نمونه‌ی به‌کار رفته در شبیه‌سازی، با ابعاد ٢٠٠×٢٠٠ میلی‌متر، مشاهده می‌شود.

تعیین نمودارهای FLD و FLSD با شبیه‌سازی

نتایج در مراحل مختلف شبیه‌سازی تحلیل شدند و برای این‌کار، از معیار شکست نرم استفاده شد. چگونگی استخراج داده‌های لازم برای رسم نمودارهای حد کرنش و حد تنش شکل‌دهی با استفاده از معیار شکست نرم، در شکل (٧) نشان داده شده است. اگر مقدار عددی به‌دست آمده از معیار شکست نرم به حد بحرانی برسد (این حد به‌کمک آزمون کشش تعیین می‌شود)، گلویی شدن رخ می‌دهد. تنش‌ها و کرنش‌های مربوط به این لحظه، تنش‌ها و کرنش‌های حدی در نظر گرفته می‌شوند.



شکل٦ مدل شبیه‌سازی شده از نمونه‌ای به ابعاد ٢٠٠×٢٠٠ میلی‌متر

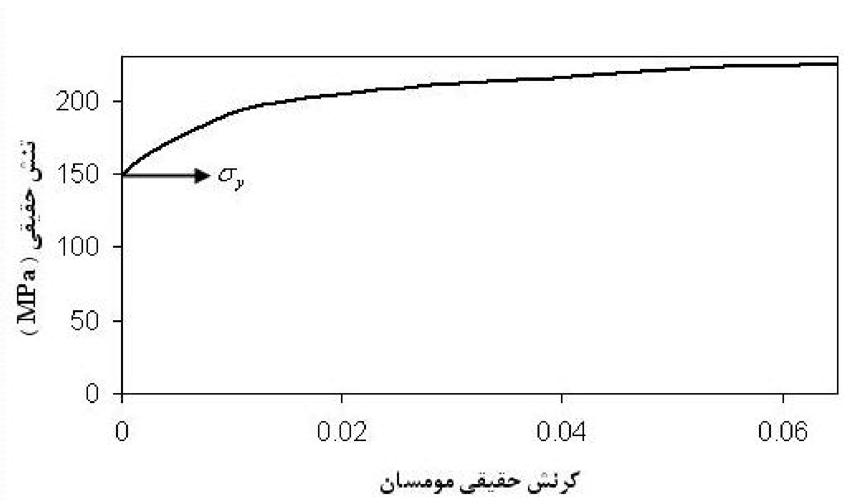


شکل ۷ چگونگی تعیین نمودارهای حد شکل‌دهی و حد تنش شکل‌دهی با شبیه‌سازی

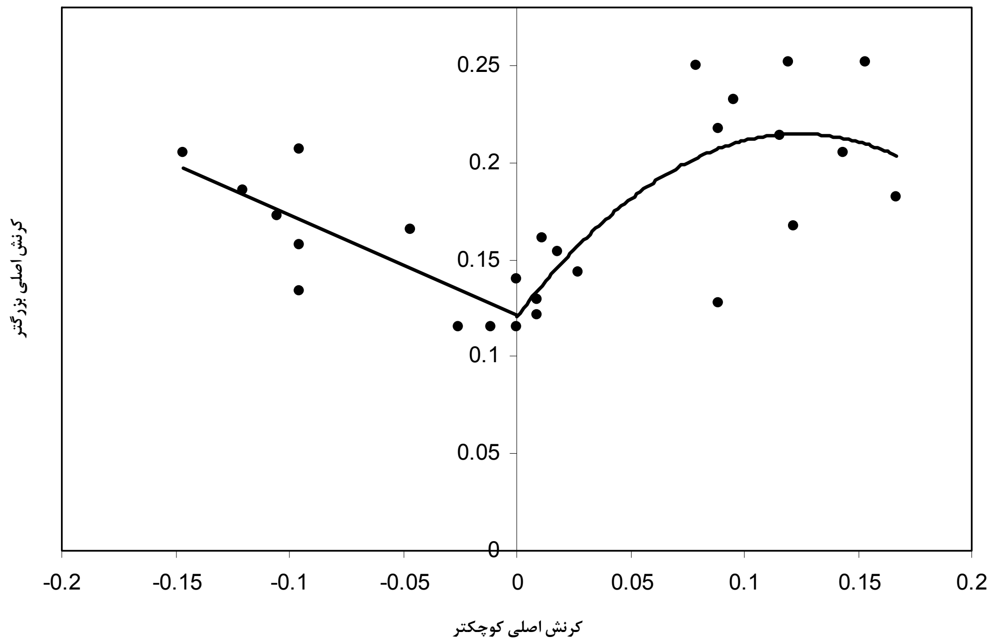
نتایج و بحث

نمودار تنش- کرنش آلیاژ آلومینیم ۳۱۰۵ که از آزمون کشش تک‌محوری به‌دست آمده است، در شکل(۸) نشان داده شده است. توان کار سختی (n) و ضریب استحکام (K) در رابطه‌ی $\sigma = K\varepsilon^n$، با رسم نمودار تغییرات $Log\sigma$ بر حسب $Log(\varepsilon)$ محاسبه شدند. به این ترتیب، رابطه‌ی سیلان ماده به‌صورت $\sigma = 302\varepsilon^{0.103}$ (MPa) تعیین شد. شکل (۹)، نمودار

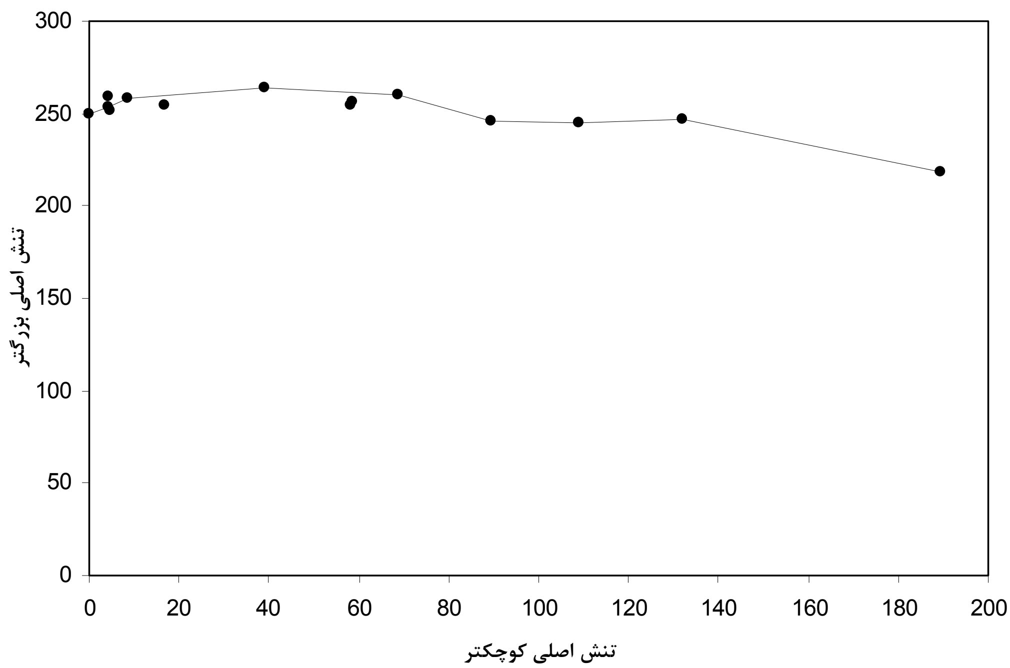
FLD حاصل از آزمون کشش خارج از صفحه را بـرای آلیاژ آلومینیم ۳۱۰۵ نشان می‌دهد. این نمودار با استفاده از کرنش‌های حدی با اعمـال سـرعت شـکل‌دهـی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه، به‌دست آمده است. در آزمون خـارج از صفحه، گلویی شدن و شکست بـه عـواملی از قبیـل کرنش سـختی، رفتـار نـاهم‌سـان‌گـردی ورق، شـرایط اصطکاک و شیب کـرنش وابـسته‌انـد. در تغییـر شـکل خارج از صفحه، عوامـل هندسـی و اصـطکاکی نقـش تعیین کننده‌ای داشته و در واقع، باعث جابجایی محـل گلویی شدن می‌شوند [18]. افزون بر این، کـرنش‌هـای حـدی حاصـل از آزمـون‌هـای تجربـی بـا اسـتفاده از رابطه‌های (۵) تا (۱۳) به تنش‌های حدی تبدیل شده و نمودار حد تنش شکل‌دهی رسم شـد. در شـکل (۱۰)، نمودار حد تنش شـکل‌دهـی حاصـل از نتـایج تجربـی نشان داده شده است. برای تعیین صـحت شـبیه‌سـازی انجام شده، نمودارهای نیرو- جابجایی مربـوط بـه هـر یک از نمونه‌ها که از بررسی‌های تجربی و شبیه‌سـازی به دست آمده بودند، با یکدیگر مقایسه شدند. در شکل (۱۱)، نمودارهای نیرو- جابجایی تجربی و شبیه‌سـازی شده‌ی یکی از نمونـه‌هـا بـا یکـدیگر مقایـسه شـده و صحت شبیه‌سازی تأیید شده است. نمودارهای FLD و FLSD به‌دست آمده از شبیه‌سازی با طی مراحل نـشان داده شــده در شــکل (۷)، پــس از اعمــال معیارهــای شکست نرم کلیفت، کاک‌رافت و بـرزو در شـکل‌هـای (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده و با نتایج تجربی مقایـسه شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نمودارهای حد شکل‌دهی و حد تنش شکل‌دهـی پـیش‌بینـی شـده بـا استفاده از معیارهای شکست نرم اندکی با نتایج تجربی اختلاف دارند. علت‌های بروز این اخـتلاف مـی‌توانـد وجود خطاهایی در روند شبیه‌سـازی و نیـز، خطاهـای موجـود در رابطـه‌هـای نظـری مربـوط بـه معیارهـای شکست نرم، به‌دلیل سـاده‌سـازی‌هـای انجـام شـده در آن‌ها، باشد. با وجود این اختلاف‌ها، می‌توان گفت کـه معیارهای شکست نرم کار پیش‌بینی نمودارهـای FLD و FLSD را با تقریب نسبتاً خوبی انجام می‌دهند.



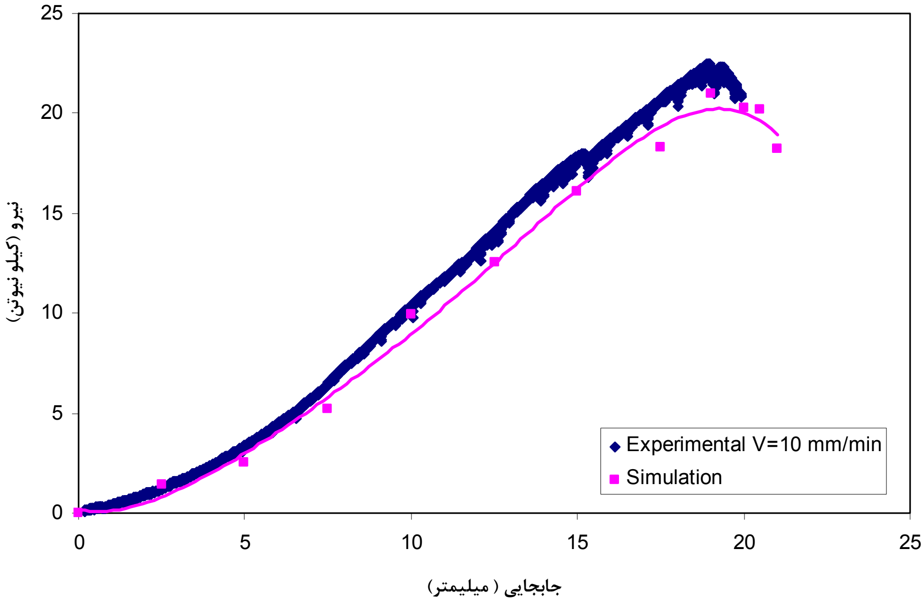
شکل ۸ نمودار تنش- کرنش حقیقی برای آلیاژ آلومینیم ۳۱۰۵



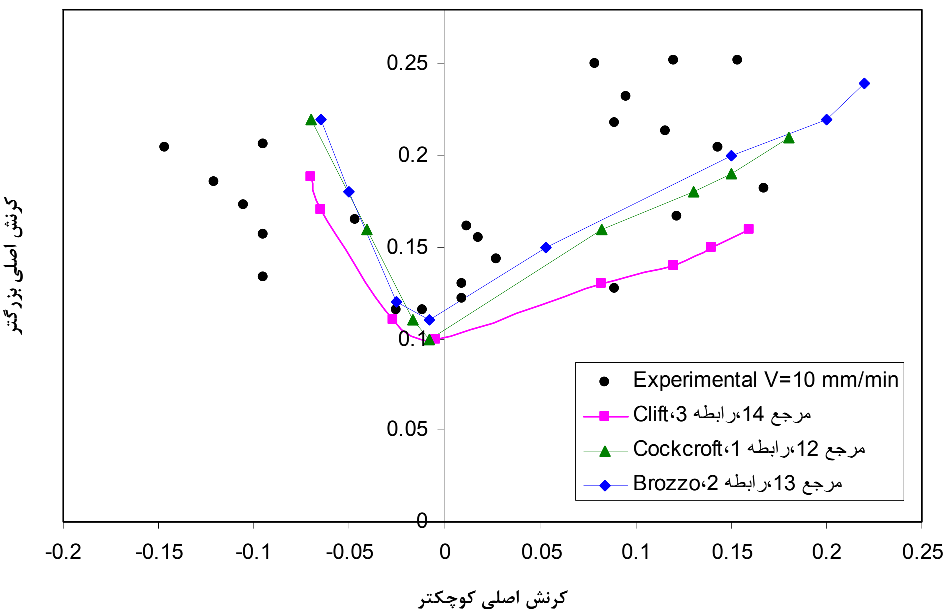
شکل۹ نمودار حد شکل‌دهی (FLD) برای آلیاژ آلومینیم ۳۱۰۵ به‌دست آمده از بررسی‌های تجربی
با سرعت شکل‌دهی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه



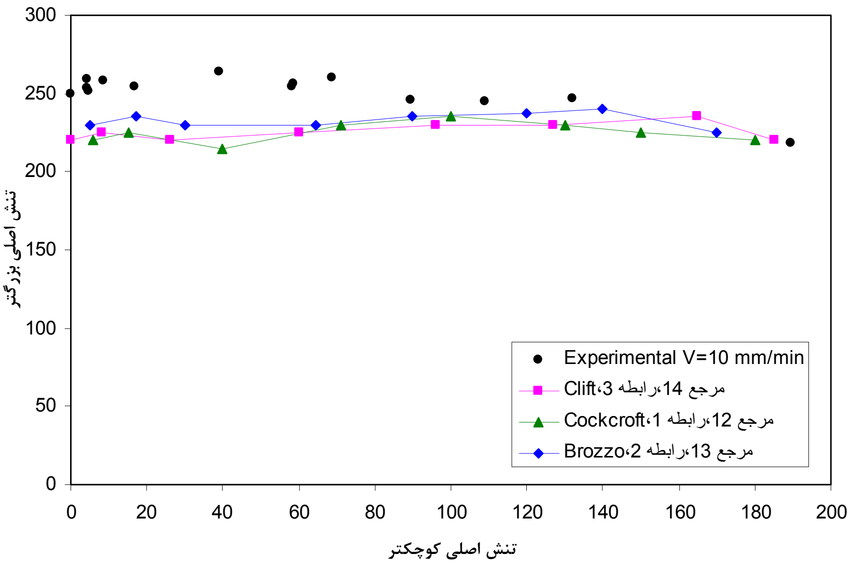
شکل۱۰ نمودار حد تنش شکل‌دهی (FLSD) برای آلیاژ آلومینیم ۳۱۰۵ به‌دست آمده از بررسی‌های تجربی
با سرعت شکل‌دهی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه



شکل ۱۱ مقایسه‌ی نمودارهای نیرو- جابجایی تجربی و شبیه‌سازی شده
با سرعت شکل‌دهی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه



شکل ۱۲ مقایسه‌ی نمودارهای FLD حاصل از نتایج تجربی و شبیه‌سازی برای آلیاژ آلومینیم ۳۱۰۵



شکل ۱۳ مقایسه‌ی نمودارهای FLSD حاصل از نتایج تجربی و شبیه‌سازی برای آلیاژ آلومینیم ۳۱۰۵

نتیجه گیری

در این تحقیق، نمودار حد شکل‌دهی برای ورقی از جنس آلیاژ آلومینیم ۳۱۰۵ به‌روش تجربی و با انجام آزمون کشش خارج از صفحه‌ی ناکازیما به دست آمد. نمودار حد تنش شکل‌دهی نیز به‌کمک مقادیر کرنش و با استفاده از رابطه‌های استافتون محاسبه شد. افزون بر این، با ارائه‌ی یک الگوریتم، نمودارهای حد شکل‌دهی و حد تنش شکل‌دهی با اعمال معیارهای شکست نرم کلیفت، کاک‌رافت و برزو و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، به‌دست آمدند. نمودارهای حد شکل‌دهی و حد تنش شکل‌دهی که با استفاده از معیارهای شکست نرم پیش‌بینی شدند، اندکی با نتایج تجربی به‌دست آمده اختلاف داشتند. این اختلاف به وجود خطاهایی در روش شبیه‌سازی و نیز، خطاهای ناشی از کاربرد رابطه‌های نظری مربوط به معیارهای شکست نرم، به‌دلیل ساده‌سازی‌های انجام شده در آن‌ها، نسبت داده شد. با وجود این اختلاف‌ها، دیده شد که معیارهای شکست نرم را می‌توان با تقریب نسبتاً خوبی برای پیش‌بینی نمودارهای FLD و FLSD به‌کار برد.

فهرست نمادها

پیش‌کرنش‌ها	ε_{1i} ، ε_{2i}
میزان‌های نهایی کرنش	ε_{1f} ، ε_{2f}
تنش‌های اصلی	σ_1 ، σ_2
تنش معادل	$\bar{\sigma}$
تنش بیشینه	σ_{Max}
تنش هیدروستاتیک	σ_h
نسبت کرنش	ρ
نسبت تنش	α
ثابت‌های مربوط به نوع ماده	C_1 , C_2 , C_3
ضریب استحکام ماده	K
توان تابع تسلیم هیل	M
ضریب ناهمسان‌گردی	R
کرنش‌های اصلی	ε_1 ، ε_2
کرنش معادل	$\bar{\varepsilon}$
کرنش معادل شکست	$\bar{\varepsilon}_f$
کرنش‌های عرضی، طولی و در جهت ضخامت	ε_w ، ε_l ، ε_t

مراجع

1. Ozturk, F., and Lee, D., "Experimental and numerical analysis of out-of-plane formability test", *J. Mat. Proc. Tech.*, 170, pp. 247–253, (2005).

2. Keeler, S. P., and Backhofen, W.A., "Plastic instability and fracture in sheet stretched over rigid punches", *ASM Transactions Quarterly*, 56, pp. 25-48, (1964).

3. Goodwin, G.M., "Application of strain analysis to sheet metal forming in the press shop", *SAE paper*, No. 680093, (1968).

4. Hecker, S. S., "Simple technique for determining forming limit curves", *Sheet Met. Ind.*, 52, pp. 671-676, (1975).

5. Kleemola, H. J., and Pelkkikangas, M. T., "Effect of pre-deformation and strain path on the forming limits of steel copper and brass", *Sheet Met. Ind.*, 63, pp. 591-599, (1977).

6. Arrieux, R., Bedrin, C., and Boivin, M., "Determination of an intrinsic forming limit stress diagram for isotropic metal sheets", In: *Proceedings of the 12th Biennial Congress of the IDDRG*, pp. 61–71, (1982).

7. Stoughton, T.B., "A general forming limit criterion for sheet metal forming", *Int. J. Mech. Sci.,* 42, pp. 1–27, (2000).

8. Takuda, H., Mori, K., and Hatta, N., "The application of some criteria for ductile fracture to the prediction of the forming limit of sheet metals", *J. Mat. Proc. Tech.*, 95, pp. 116-121, (1999).

9. Jain, M., Allin, J., and Lloyd, D. J., "Fracture limit prediction using ductile fracture criteria for forming an automotive aluminum sheet", *Int. J. Mech. Sci.*, 41, pp. 1273-1288, (1999).

10. Takuda, H., Mori, K., Takakura, N., and Yamaguchi, N., "Finite element analysis of limit strains in biaxial stretching of sheet metals allowing for ductile fracture", *Int. J. Mech. Sci.,* 42, pp. 785-798, (2000).

11. Han, H. N, and Kim, K. H, "A ductile fracture criterion in sheet metal forming process", *J. Mat. Proc. Tech.*, 142, pp. 231–238, (2003).

12. Cockroft, M.G. and Latham, D.J., "Ductility and the Workability of Metals", *J.Inst. Met.,* 96, pp.33-39, (1968).

13. Brozzo, P., Deluca, B., and Rendina, R., "A New Method for the Prediction of Formability in Metal Sheets", In: *Proceedings of the 12th Biennial Congress of the IDDRG*, on Sheet Metal Forming and Formability, (1972).

14. Clift, S.E., Hartley, P., Sturgess, C.E.N., and Rowe. G.W., "Fracture Prediction in Plastic Deformation Processes", *Int. J. Mech. Sci.*, 32, pp. 1-17, (1990).

15. Assempour, A., Hashemi , R., Abrinia , K., Ganjiani , M., and Masoumi , E., "A methodology for prediction of forming limit stress diagrams considering the strain path effect", *J.Comp. Mat. Sci.*, 45, pp. 195-204, (2009).

16. Nandedkar, V. M., Narasimhan, K., "Measurement of strain history during the stretching of forming-grade steel sheets", *J. Mat. Proc. Tech.*, 89-90, pp. 24–29, (1999).

17. Dariani, B.M., Azodi, H.D., "Finding the optimum Hill index in the determination of the forming limit diagram", Proc. *Instn Mech. Engrs, Part C: J. Mech. Eng. Sci.*, 217, 1677–1683, (2003).

18. Moshksar, M.M., Mansorzadeh, S., "Determination of the forming limit diagram for Al 3105 sheet", *J. Mat. Proc. Tech.*, 141, 138-142, (2003).